

УДК 621.438.003

А.А. ОБЛЕУХОВ, Д.С. ШАЛАЕВ, Т.П. ГРЫЗЛОВА

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия
имени П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия*

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ WAVELET-ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВИБРОСИГНАЛОВ В ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ

Представлены две новые системы диагностических признаков, полученные на основе структурного анализа диагностических вибросигналов. В первом случае строятся графики вибросигналов, далее выполняется концептуальный анализ изображения. Характеристики репрезентативных элементов изображения и являются исходной системой признаков. Вторая система получается как совокупность характеристик функций сложности сигнала и Wavelet-разложения в базисе функций Хаара с последующей оценкой результатов их декомпозиции с помощью функций сложности. Представлены результаты расчетов информативности признаков на основе анализа графиков и декомпозиции сигнала по Wavelet-коэффициентам в задачах оценки состояния подшипников трансмиссии ГТД и испытаниях подшипников на надежность. Выбраны признаки с показателями информативности много более высокими, чем информативность признаков в действующих методиках диагностики подшипников трансмиссии ГТД. Информативность найденных признаков позволяет строить линейные классификаторы с простыми решающими правилами.

Ключевые слова: оценка информативности признаков, репрезентативные элементы, системы концептуального описания изображений, Wavelet-коэффициенты, функция сложности, диагностика состояния подшипников ГТД.

Введение

Формальной процедуры задания исходной системы признаков для решения задачи диагностики состояния сложного технического объекта пока не существует. Признаки, используемые при решении тех или иных задач, задаются лишь на основании опыта и интуиции специалиста. Из исходной системы признаков методами теории распознавания образов можно выбрать более экономичную и информативную подсистему признаков (образ). Существует мнение, что нужно задавать все характеристики, которые можно заподозрить в информативности. На практике чрезмерное расширение системы признаков не безвредно из-за того, что степень представительности выборки одного объема обратно пропорциональна размерности пространства признаков [1]. Объективным критерием потенциального качества распознающей системы является информативность признаков. Оценку информативности признаков можно получить с помощью «Системы оценки признаков и признаковых пространств».

В настоящей работе представлены две новые системы диагностических признаков, выполнена оценка их информативности в задаче диагностики состояния подшипников трансмиссии ГТД [2] и в задаче испытаний подшипников на надежность [3].

Система признаков на основе графического представления вибросигналов получена с помощью алгоритмов концептуального описания изображений. Вычисляются статистики яркости, геометрические характеристики, отношение «сигнал/шум» графиков вибросигналов, построенных с помощью пакета Excel по строго фиксированному формату. Далее задача диагностики состояния подшипников решена как задача распознавания изображений.

Вторая система получена на основе Wavelet-представления сигналов и характеристик функций сложности сигналов и Wavelet-коэффициентов [4].

1. Задачи диагностики состояния подшипников

Для анализа информативности графического представления вибросигналов и Wavelet-представления были выбраны две задачи: задача диагностики состояния подшипников трансмиссии ГТД и задача обнаружения неисправности подшипников при испытаниях на надежность. Данные для первой задачи были представлены «ОАО «Сатурн», для второй – взяты с сайта [3].

В эксперименте рассматривались два набора данных. В качестве первого набора данных использовались вибросигналы, зарегистрированные во

время испытаний подшипников трансмиссии газотурбинных двигателей (ГТД). Выборка вибросигналов снималась с 7 подшипников, которые по среднеквадратичному отклонению вибросигнала были разбиты на три класса $C = \{C_1, C_2, C_3\}$:

- C_1 – кондиционные (2 подшипника);
- C_2 – с дефектом (3 подшипника);
- C_3 – необоснованно снятые (2 кондиционных подшипника, которые по среднеквадратичному отклонению вибросигнала были признаны подшипниками с дефектом).

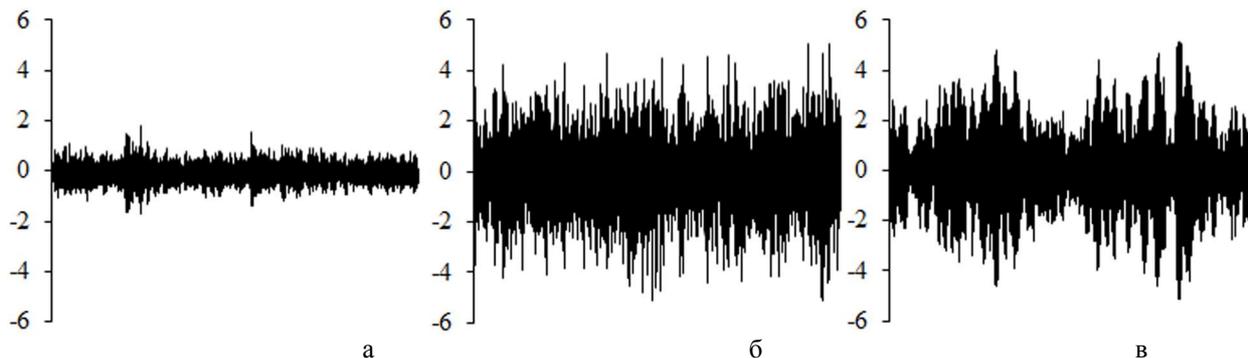


Рис. 1. Графики вибросигналов подшипников:
а – подшипники класса C_1 ; б – подшипники класса C_2 ; в – подшипники класса C_3

2. Системы признаков для описания вибросигналов

2.1. Графическое представление реализаций вибросигнала

Под графическим представлением реализации вибросигнала понимается изображение графика (рис. 1), построенного по значениям выборки вибросигнала $S_i(t)$, где i – номер измерения.

Требуется отнести график вибросигнала G к одному из множества классов C .

Для всех графиков вибросигналов подшипников проведено масштабирование по оси Y (амплитуда вибросигнала), а изображение графика, подаваемое на вход «Системы концептуального описания изображения» представлено матрицей яркости L^i , с размерами 240×190 . Каждый элемент матрицы $L^i_{x,y} \in \{0,1\}$ определяет точку бинарного изображения графика вибросигнала подшипника с координатами (x, y) .

Процесс получения характеристик состоит из этапов: фильтрации, бинаризации, выделения контуров, разметки областей и вычисления характеристик репрезентативных элементов.

Этап фильтрация представляет собой свертку изображения L^k матрицей H :

Поскольку в задаче диагностики подшипник имеет кондиционное и не кондиционное состояние, то класс C_3 данной выборки был объединен с классом C_1 .

Второй набор данных представлен измерениями сигналов регистрируемых в разные моменты времени на 4-х подшипниках, один из которых был дефектным [3], таким образом, была получена выборка, состоящая из 15 кондиционных (C_1) и 15 некондиционных (C_2).

$$F_{x,y}^k = \sum_{i=-r}^r \sum_{j=-r}^r L_{x+i,y+j}^k \cdot H_{i,j} \quad (1)$$

Квадратная матрица свертки задается выражением:

$$H_{x,y} = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

В рассматриваемом эксперименте пространственная фильтра σ , зависящая от размеров матрицы свертки, составляет 3.75, что соответствует размеру рецептивного поля 14×14 .

В результате выполнения свертки будет получена матрица вещественных чисел, по которой в дальнейшем находится сигнал пересечения нулевого уровня.

Для поиска точек пересечения сигналом нулевого уровня выполняется бинаризация результатов фильтрации:

$$V_{x,y}^k = \begin{cases} 1, & \text{при } F_{x,y}^k > 0; \\ -1, & \text{при } F_{x,y}^k \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для выделения контура производится сначала горизонтальное, а затем вертикальное сканирование матрицы V^k , и в случае, когда элемент матрицы $V^k_{x,y}$ меняет знак, производится отметка соответствующего элемента матрицы $E^k_{x,y} = -2$.

Этап разметки связных областей необходим для индексации производных элементов. Каждой точке контура и точке области производного элемента, устанавливается числовой индекс. В результате выполнения разметки связных областей формируется матрица A^k элемент которой содержит числовое значение – индекс области. Индекс области необходим для последующего расчета характеристик производных элементов.

После выполнения разметки связных областей системой концептуального описания изображения производится вычисление характеристик репрезентативных элементов. В общей сложности системой вычисляются 24 числовые характеристики, которые условно подразделяются на яркостные, геометрические и комбинированные.

Множество яркостных характеристик $P_L = \{P_1 \dots P_9\}$ состоит из средней яркости, СКО, энтропии, эксцесса, асимметрии, минимальной и максимальной яркости, размаха и отношения «сигнал/шум».

Множество геометрических характеристик $P_G = \{P_{10} \dots P_{18}\}$ представлено следующими характеристиками:

$P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}$ – параметры прямоугольного окна, который описывает репрезентативный элемент: координата левого верхнего угла, ширина и высота;

P_{14} – периметр – количество точек контура репрезентативного элемента;

P_{15} – площадь – количество точек, имеющих одинаковый индекс области;

P_{16} – компактность – это отношение квадрата периметра к площади;

P_{17} – эксцентриситет эллипса с главными моментами инерции, равными главным моментам инерции репрезентативного элемента;

P_{18} – ориентация главной оси симметрии, характеристика представляет полезную информацию об ориентации объекта и вычисляется в радианах.

Множество комбинированных характеристик $P_C = \{P_{19} \dots P_{24}\}$, задается на ранее вычисленных яркостных или пространственных характеристиках:

P_{19} – отношение сторон прямоугольного окна;

P_{20} – площадь прямоугольного окна;

P_{21} – отношение площади репрезентативного элемента к площади прямоугольного окна;

P_{22} – отношение площади прямоугольного окна к площади окружности, которая вписана в прямоугольное окно;

P_{23} – отношение периметра репрезентативного элемента к периметру прямоугольного окна;

P_{24} – отношение периметра репрезентативного элемента к периметру окружности.

2.2. Декомпозиция вибросигнала по характеристикам Wavelet-коэффициентов

Построение вектора признаков осуществлялось по алгоритму, представленному в [4]. Вычисление вектора образов на основе функции сложности самого сигнала заключается в следующем. Исходный сигнал длины N раскладывается на блоки равной длины b (в отсчетах). Их количество равно целой части.

$$s_0^{N-1} \rightarrow e_0^{b-1} \cdot e_b^{2b-1} \cdot \dots \cdot e_{(i-1)b}^{ib-1} \cdot \dots \cdot e_{(l-1)b}^{lb-1}. \quad (4)$$

Далее вычисляются значения функции сложности:

$$\Phi(e_i) = \left(e_i, \frac{1}{2}(e_{i-1} + e_{i+1}) \right). \quad (5)$$

По значениям формулы (5) выносятся решение о наличии границы сегмента, в случае если функция сложности превышает заданный порог.

Построение вектора признаков на основе функции сложности Wavelet-коэффициентов выполнялось по аналогии с вычислением вектора образов на основе функции сложности самого сигнала. Wavelet-коэффициенты на каждом уровне разбиваются на инструментальные блоки равной длины b . Далее вычислялись функции сложности 1-го типа [5] для Wavelet-коэффициентов на разных уровнях:

$$s_0^{N-1} \rightarrow \begin{pmatrix} (w_1)_0^{N/2-1} \\ (w_2)_0^{N/4-1} \\ \dots \\ (w_L)_0^{N/2^L-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_1(j_1) \\ \Phi_2(j_2) \\ \dots \\ \Phi_L(j_L) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Вычислялась последовательность скалярных произведений блоков Wavelet-коэффициентов для каждого уровня w :

$$\rho_0^{N/2^i} \rightarrow \rho_{i,j} \left(w_j^{j+b-1}, w_{j+b}^{j+2b-1} \right), \quad j = 0 \dots \frac{N}{2^i}. \quad (7)$$

Функция сложности на уровне i привязана к номеру блока j в пределах уровня и вычисляется как среднее двух соседних скалярных произведений:

$$\Phi_{i,j} = \left(\rho_{i,j}, \frac{1}{2}(\rho_{i,j-1} + \rho_{i,j+1}) \right). \quad (8)$$

Для определения границ сегментов были найдены локальные экстремумы функций сложности, на основе сравнения значений функций сложности с пороговым значением. Если функция сложности превысила порог, то выносилось решение о наличии границы. Если по индексу j элементарной последовательности на уровне $i \in \{1, 2, \dots, L\}$ обнаруживается граница сегмента, то пересчет в индекс сигнальной последовательности выполняется по правилу:

$$t_{ki} = j_i \cdot 2^i \cdot b, \quad k_i = 1, 2, \dots, K_i, \quad (9)$$

где k_i – индекс границ сегментов. Моменты перехода между сегментами вычисляются как $\tilde{t}_{ki} = t_{ki} \cdot \Delta t$. Методическая погрешность определения границы зависит от уровня и равна: $\varepsilon \in 0..-(2^L + b)$.

Далее по функциям сложности были получены следующие признаки:

- количество моментов перехода между сегментами;
- минимум функции сложности сигнала;
- максимум функции сложности сигнала.

Предварительный анализ показал, что использование этих признаков не достаточно для разделения образов принадлежащих разным классам $\{C_1, C_2, C_3\}$ и были исследованы следующие характеристики:

P_{25} – минимум функции сложности Wavelet-коэффициентов;

P_{26} – максимум функции сложности Wavelet-коэффициентов;

P_{27} – количество моментов перехода между сегментами функции сложности Wavelet-коэффициентов.

Дополнительно вычислялись статистические характеристики сигнала и Wavelet-коэффициентов:

P_{28} – математическое ожидание;

P_{29} – среднеквадратичное отклонение;

P_{30} – эксцесс;

P_{31} – энтропия;

P_{32} – нормированная информационная мера;

P_{33} – мера Лоренца.

3. Анализ информативности признаков

Для анализа полученных характеристик репрезентативных элементов была подготовлена матрица входных данных D для «Системы оценки признаков и признаковых пространств». В используемой системе оценка информативности представляет собой отношение межклассового Евклидова расстояния в признаковом пространстве к среднему внутриклассовому расстоянию.

3.1. Информативность графического представления вибросигналов

В табл. 1 и 2 приведены результаты оценки информативности на основе анализа графического представления реализации вибросигналов на одномерном признаковом пространстве X_1 .

При анализе графического представления сигналов наиболее информативными характеристиками

являются: P_3 – энтропия, P_{14} – периметр графика вибросигнала, P_{15} – площадь графика, P_{18} – ориентация главной оси симметрии графика и P_{23} – отношение периметра графика вибросигнала к рамке прямоугольного окна.

Таблица 1

Информативность графического представления вибросигналов в задаче диагностики состояния подшипников ГТД (выборка 1)

X_1	$I(X_1)$	X_1	$I(X_1)$	X_1	$I(X_1)$
P_1	0,402	P_9	0	P_{17}	0,604
P_2	0,398	P_{10}	0,396	P_{18}	0,61
P_3	0,67	P_{11}	0,357	P_{19}	0,463
P_4	0,392	P_{12}	0,557	P_{20}	0,583
P_5	0,395	P_{13}	0,444	P_{21}	0,595
P_6	0	P_{14}	0,589	P_{22}	0,488
P_7	0	P_{15}	0,657	P_{23}	0,55
P_8	0,402	P_{16}	0,664	P_{24}	0,494

Таблица 2

Информативность графического представления вибросигналов в задаче оценки надежности подшипников (выборка 2)

P_1	0,639	P_9	0	P_{17}	1,144
P_2	0,671	P_{10}	0,668	P_{18}	1,495
P_3	0,807	P_{11}	0,537	P_{19}	0,863
P_4	0,657	P_{12}	0,558	P_{20}	1,803
P_5	0,652	P_{13}	0,559	P_{21}	1,456
P_6	0	P_{14}	1,568	P_{22}	0,992
P_7	0	P_{15}	1,565	P_{23}	2,376
P_8	0,639	P_{16}	0,927	P_{24}	1,287

3.2 Анализ информативности Wavelet-представления сигналов

В табл. 3 и 4 приведены результаты оценки информативности на основе декомпозиции вибросигнала по характеристикам Wavelet-коэффициентов.

При применении алгоритма декомпозиции сигнала по характеристикам Wavelet-коэффициентов наибольшую информативность имеют такие признаки как $P_{25}(I_{w1})$ – минимум функции сложности и $P_{27}(I_1)$, $P_{27}(I_{w1})$ – количество моментов перехода между сегментами. Среди статистических информационных характеристик следует отметить СКО сигнала $P_{29}(I_1)$, СКО Wavelet-коэффициентов $P_{29}(I_{w1})$, $P_{29}(I_{w2})$, $P_{29}(I_{w3})$ и информационная мера Лоренца $P_{34}(I_1)$.

Таблица 3

Информативность Wavelet - представления вибросигналов
в задаче диагностики состояния подшипников ГТД (выборка 1)

	I_1	I_{w1}	I_{w2}	I_{w3}	I_{w4}	I_{w5}	I_{w6}
P_{25}	0,478	1,794	0,463	0,448	0,732	0,765	0,443
P_{26}	0,83	0,521	0,457	0,447	0,42	0,713	0,537
P_{27}	0,929	0,869	0,435	0,397	0,481	0,467	0,803
P_{28}	0,51	0,498	0,547	0,546	0,422	0,639	0,591
P_{29}	0,685	0,514	0,449	0,581	0,616	0,464	0,477
P_{30}	0,449	0,415	0,445	0,423	0,375	0,469	0,397
P_{32}	0,605	0,393	0,526	0,509	0,421	0,5	0,414
P_{33}	0,433	0,426	0,444	0,717	0,5	0,476	0,357
P_{34}	0,619	0,39	0,497	0,51	0,419	0,422	0,41

Таблица 4

Информативность Wavelet - представления вибросигналов
в задаче оценки надежности подшипников (выборка 2)

	I_1	I_{w1}	I_{w2}	I_{w3}	I_{w4}	I_{w5}	I_{w6}
P_{25}	0,923	0,983	0,882	1,195	0,878	0,924	1,217
P_{26}	0,761	0,731	0,856	0,986	1,167	0,922	0,833
P_{27}	0,965	1,774	0,918	0,798	1,296	0,851	0,551
P_{28}	1,163	0,628	0,57	0,558	0,559	0,585	0,619
P_{29}	1,783	1,985	1,579	1,697	1,24	1,478	1,233
P_{30}	1,196	0,739	0,792	0,934	0,843	0,498	0,561
P_{32}	1,421	0,888	0,753	1,05	0,788	0,502	0,509
P_{33}	1,012	0,854	0,733	0,9	0,608	0,473	0,509
P_{34}	1,571	0,958	0,795	1,152	0,793	0,505	0,512

Информативность найденных признаков позволяет строить линейные классификаторы с простыми решающими правилами.

Таким образом, информативность найденных признаков позволяет строить линейные классификаторы с простыми решающими правилами.

Заключение

В работе приведены результаты исследования информативности характеристик репрезентативных элементов и характеристик на основе декомпозиции вибросигнала по Wavelet-коэффициентам в одномерном признаковом пространстве. По расчетам значений информативности (табл. 1 – 4) можно отобразить характеристики, информативность которых наиболее высока.

Предложены новые системы диагностических признаков для решения задачи диагностики состояния подшипников. Выбраны признаки с показателями информативности много более высокими, чем информативность признаков в действующих методах диагностики подшипников трансмиссии ГТД.

Литература

1. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение / Н.Г. Загоруйко. – М.: Сов. радио, 1972. – 224 с.
2. Шепель В.Т. Выбор признаков для диагностики технического состояния подшипников трансмиссии ГТД / В.Т. Шепель, Б.И. Комаров, Т.П. Грызлова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8 (24). – С. 200-205.
3. Technical Services 'Bearing Data Set' [Электронный ресурс] / J. Lee, H. Qiu, G. Yu, J. Lin, and so on // *IMS, University of Cincinnati. NASA Ames Prognostics Data Repository*. – Режим доступа к ресурсу: <http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/prognostic-data-repository>. – 10.12.2007.
4. Грызлова Т.П. Декомпозиция сигналов сложных источников на основе функций сложности Wavelet-коэффициентов / Т.П. Грызлова, Д.С. Шаляев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 8 (65). – С. 121-126.
5. Браверман Э.М. Структурные методы обработки данных / Э.М. Браверман, И.Б. Мучник. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 464 с.

Поступила в редакцию 2.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры РГАТА, начальник КО сертификации двигателей «ОАО «Сатурн» В.Т. Шепель, Рыбинск, Россия.

АНАЛІЗ ІНФОРМАТИВНОСТІ WAVELET-ПРЕДСТАВЛЕННЯ І ГРАФІЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ВІБРОСИГНАЛІВ В ЗАДАЧІ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ПІДШИПНИКІВ

А.О. Облеухов, Д.С. Шалаев, Т.П. Грызлова

Представлено дві нові системи діагностичних ознак, отримані на основі структурного аналізу діагностичних вібросигналів. У першому випадку будуються графіки вібросигналів, далі виконується концептуальний аналіз зображення. Характеристики репрезентативних елементів зображення і є початковою системою ознак. Друга система виходить як сукупність характеристик функцій складності сигналу і Wavelet-розкладенні в базисі функцій Хаара з подальшою оцінкою результатів їх декомпозиції за допомогою функцій складності. Представлені результати розрахунків інформативності ознак на основі аналізу графіків і декомпозиції сигналу по Wavelet-коефіцієнтам в завданнях оцінки стану підшипників трансмісії ГТД і випробуваннях підшипників на надійність. Вибрані ознаки з показниками інформативності багато вищими, ніж інформативність ознак в методиках діагностики підшипників трансмісії ГТД, що діють. Інформативність знайдених ознак дозволяє будувати лінійні класифікатори з простими вирішальними правилами.

Ключові слова: оцінка інформативності ознак, репрезентативні елементи, системи концептуального опису зображень, Wavelet-коефіцієнти, функція складності, діагностика стану підшипників ГТД.

INFORMATIVITY'S ANALYSIS OF WAVELETT AND GRAPHIC REPRESENTATIONS OF VIBRATION SIGNAL IN THE BEARINGS DIAGNOSTICS PROBLEM

A.A. Obleuhov, D.S. Shalaev, T.P. Gryzlova

The new systems of diagnostic features based on the structural analysis of vibration signals are presented. In one of the system vibration signals representations are building, afterwards the conceptual analysis of the image is making. Representative elements characteristics of the image are the basic system of features. The second system formed on the set of signal complexity functions characteristics and Haar Wavelet-decomposition. Where the analysis of decomposition results based on complexity function is performed. The results of features informativity estimation based on the analysis of wavelet and graphic representation in bearing diagnostics of GTE problems and in bearings reliability tests are presented. Features with much more informativity than informativity of features in well-known methods of bearing diagnostics are selected. The informativity of the founded features allows building linear classifiers with simple decision rules.

Key words: features informativity analysis, representative elements, systems of the conceptual description of images, Wavelet-coefficients, complexity function, bearing diagnostics of GTE.

Облеухов Антон Алексеевич – аспирант кафедры математического и программного обеспечения электронных вычислительных средств, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия, e-mail: obleuhov_aa@rgata.ru.

Шалаев Дмитрий Сергеевич – ведущий инженер кафедры математического и программного обеспечения электронных вычислительных средств, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия, e-mail: shalaev@rgata.ru.

Грызлова Татьяна Павловна – канд. техн. наук, доцент кафедры математического и программного обеспечения электронных вычислительных средств, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия, e-mail: kntnpgryzlova@mail.ru.